

А.В. Смирнов, А.Ю. Король**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ВСПУЧИВАНИЯ ПОРОД ПОЧВЫ В ВЫРАБОТКАХ
УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

Исследована численная геомеханическая модель с использованием программного продукта PHASE 2 канадской компании Rockscience. Моделирование выполнялось в три этапа. На первом этапе оценивалось упругопластическое состояние пород вокруг одиночной выработки, на втором – учитывалось наличие в ней точки бифуркации, и на третьем этапе рассмотрено влияние дальнейшей деструкции породного массива. В результате проведенных исследований установлено, что после момента вспучивания пород почвы (точка бифуркации) геомеханические параметры упругопластического состояния массива в кровле и боках выработки остаются неизменными, а в почве продолжают нарастать по нелинейному закону. По мере дальнейшей потери прочности породного массива пластическая область вокруг выработки увеличивается.

Ключевые слова: пучение пород почвы, упругопластическая устойчивость, приконтурный породный массив, численное моделирование, конечноэлементная модель, точка бифуркации, деструкция пород.

Введение

С увеличением глубины разработки месторождений угля пучение пород почвы в горных выработках становится распространенным явлением. Ему посвящены многочисленные исследования, история которых охватывает промежуток времени длительностью более 100 лет. Наиболее полный обзор их можно найти в монографии [1]. Из него следует, что из всех геомеханических моделей, предлагаемых вниманию научной общественностью, наиболее обоснованной является бифуркационная [2], предполагающая потерю упругопластической устойчивости приконтурного породного массива, ослабленного выработкой. Многочисленные натурные измерения и физическое моделирование процесса вспучивания пород почвы подтвердили правомерность этой теории [3].

Недостатком как натурных, так и лабораторных исследований является то, что явление, как правило, изучается по его внешним признакам,

которыми в данном случае являются перемещения контура выработки. Закономерности деформирования законтурного массива, особенно с учетом жесткого нагружения пород [4, 5], остаются за рамками рассмотрения. Численное моделирование, как дополнение к натурным исследованиям, позволяет устранить этот недостаток.

Методы исследований

При разработке и анализе геомеханической модели вспучивания пород почвы в горных выработках был использован программный продукт PHASE 2 канадской компании Rockscience, хорошо зарекомендовавший себя в подобного рода исследованиях [5].

В качестве объекта численного моделирования выбран 8-й северный вентиляционный штрек уклонного поля пласта m_5^5 гор. 450 м ПСП «Шахта «Добропольская», который проводился навстречу движущемуся забою лавы, что является особенностью этой выработки. Взаимодействие сложной гео-

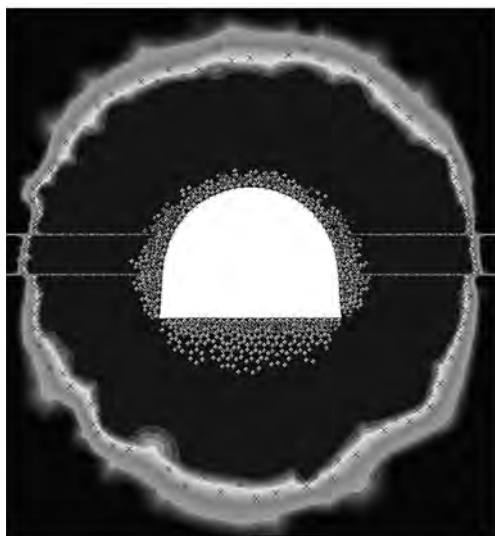


Рис. 1. Конфигурация зоны неупругих деформаций при $H = H_{кр}$

механической системы «забой лавы – имеющийся штрек – проводимая выработка» в горно-геологических условиях ПСП «Шахта «Добропольская» приводит к интенсификации проявлений горного давления, к необходимости учитывать это обстоятельство при разработке систем крепи и охранных мероприятий.

Расчетная схема является многоэтапной. На этапе I моделируется устойчивость одиночной выработки, на этапе II – наличие точки бифуркации,

и на этапе III оценивается последующая деструкция породного массива. Глубина расположения комплекса выработок 740 м.

Исследуется геомеханическая ситуация, при которой уровень напряжений в окрестности выработки непрерывно возрастает с увеличением глубины ее расположения – H . На глубине 740 м вокруг выработки формируется зона неупругих деформаций, которая при коэффициенте бокового распора $\lambda = 1$ имеет форму, близкую к круговой (рис. 1) с радиусом R_L , равным 4,3 м.

При достижении некоторой критической (этап I) глубины $H \geq H_{кр}$ происходит вспучивание пород почвы выработки. Этой ситуации соответствует равенство правой и левой части критерияльного соотношения [1]

$$\bar{\varepsilon}_v r_L^* \ln r_L^{*2} = 2, \quad (1)$$

где r_L^* – критическое значение радиуса области неупругих деформаций, $\bar{\varepsilon}_v$ – среднее значение коэффициента пластичного разрыхления пород в приконтурной зоне (принимается по результатам лабораторных испытаний горных пород в условиях «жесткого» нагружения).

При $r_L > r_L^*$ происходит потеря упругопластической устойчивости приконтурного массива в области $r_L^* > r_L > 1$ и начинается процесс пучения пород

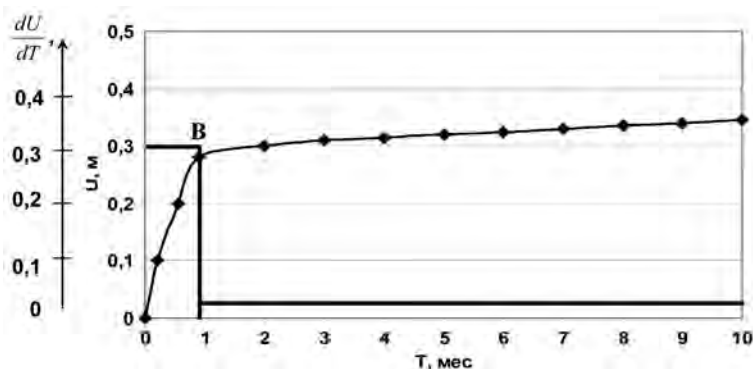


Рис. 2. Процесс деформирования пород почвы в одиночной выработке: В – точка бифуркации: U – перемещения, dU/dT – скорость перемещений

почвы в выработке (этап II). На модели это имитируется искусственным поднятием точки, расположенной в центре почвы, на величину 0,02 м. Такое казалось бы небольшое на первый взгляд воздействие является характерным для явления потери устойчивости любой механической системы. Характерный график нарастания деформаций в почве выработки по мере удаления забоя от рассматриваемого сечения, включая переход через точку бифуркации B , приведен на рис. 2.

На рис. 3 показана конфигурация зоны неупругих деформаций в момент вспучивание пород почвы, что соответствует точке бифуркации B на графике рис. 2.

Видно, что со стороны почвы зона разрушенных пород простирается на 10,5 м. Это в 2,5 раза больше, чем в кровле и боках выработки. Дальнейший анализ показал, что по мере поднятия пород почвы размер зоны неупругих деформаций в почве выработки растет, а в кровле остается практически неизменным. Этот вывод можно сделать и в отношении перемещений контура выработки (рис. 4).

При дальнейшем уходе забоя выработки от рассматриваемого сечения со временем продолжается смещение

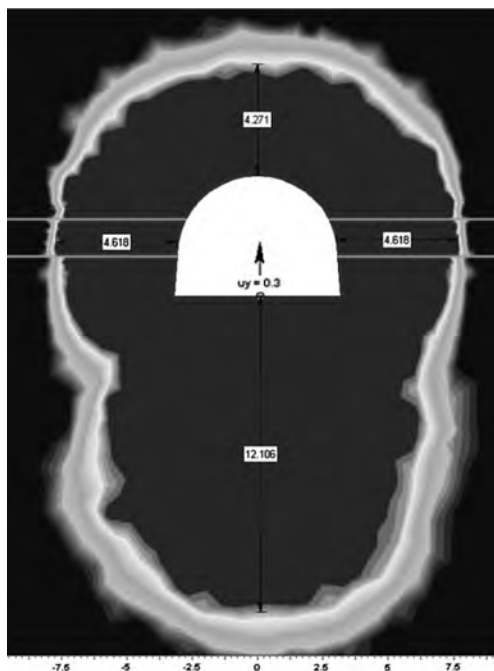


Рис. 3. Конфигурация зоны неупругих деформаций после вспучивания пород почвы (этап II)

прочности боковых пород уже в условиях пучения пород почвы (этап III). При этом предел прочности вмещающих пород условно уменьшается от начального значения R_c до $(0,7; 0,5; 0,34; 0,1)R_c$. В процессе решения чис-

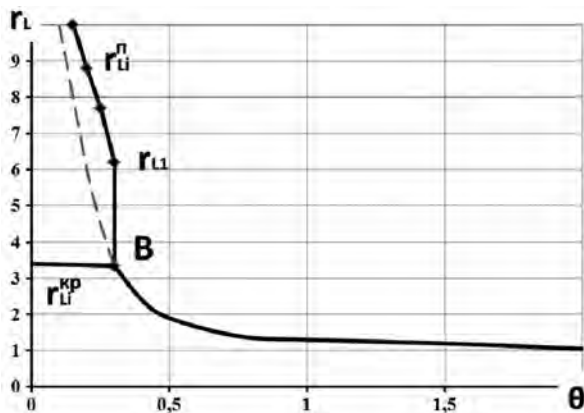


Рис. 4. Изменение размеров неупругих деформаций в кровле ($r_L^{кр}$) и почве (r_L^n) выработки по мере увеличения поднятия пород почвы

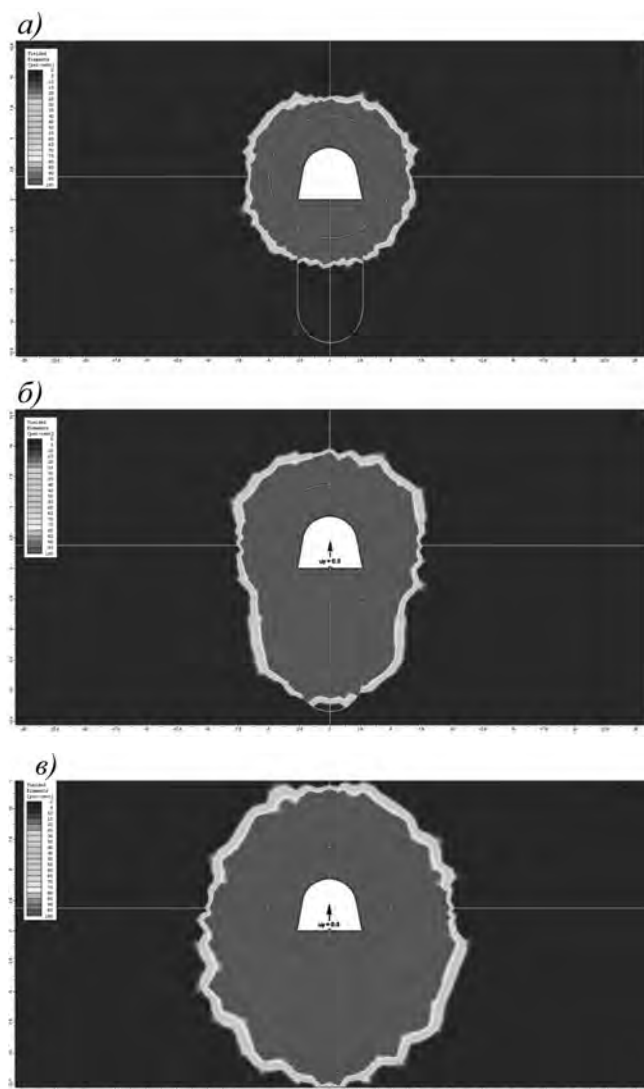


Рис. 5. Конфигурация области неупругих деформаций вокруг выработки по мере ухода забоя: а) этап I; б) этап II; в) этап III

ленной задачи на этом этапе исследуются вертикальные перемещения на контуре выработки и в глубине массива, а также рассматривается появление зон растягивающих напряжений.

На рис. 5 показаны конфигурации областей неупругих деформаций для всех трех этапов моделирования. Геометрически правильные фигуры ограничивают области, в которых проис-

ходит уменьшение прочности пород. На рис. 5, а коэффициент снижения прочности (деструкции) равен 1.

На рис. 5, б показана конфигурация области неупругих деформаций после прохождения геомеханической системой точки бифуркации. В почве образуется вытянутая вниз область, породы в центре которой подвергаются наибольшей деструкции. Последующие расчеты были выполнены для коэффициента деструкции пород $k = 0,7; 0,5; 0,3; 0,1$. На рис. 5, в показано, как изменилась конфигурация и размеры области неупругих деформаций для случая, когда $k = 0,1$. Видно, что область увеличена по отношению ко второму варианту, она по форме приближается к эллипсу. При этом существенно изменилась картина вертикальных перемещений, они распространяются на большую глубину и более интенсивны.

На рис. 6 показано изменение вертикальных перемещений в кровле и почве выработки в зависимости от уменьшения прочности пород.

Из них следует, что после реализации всех геомеханических процессов на всех трех этапах развития геомеханических процессов происходит дальнейшее изменение параметров упруго-пластического состояния по нелинейному закону. При этом перемещения почвы и кровли подчиняются соответственно следующим логарифмическим зависимостям:

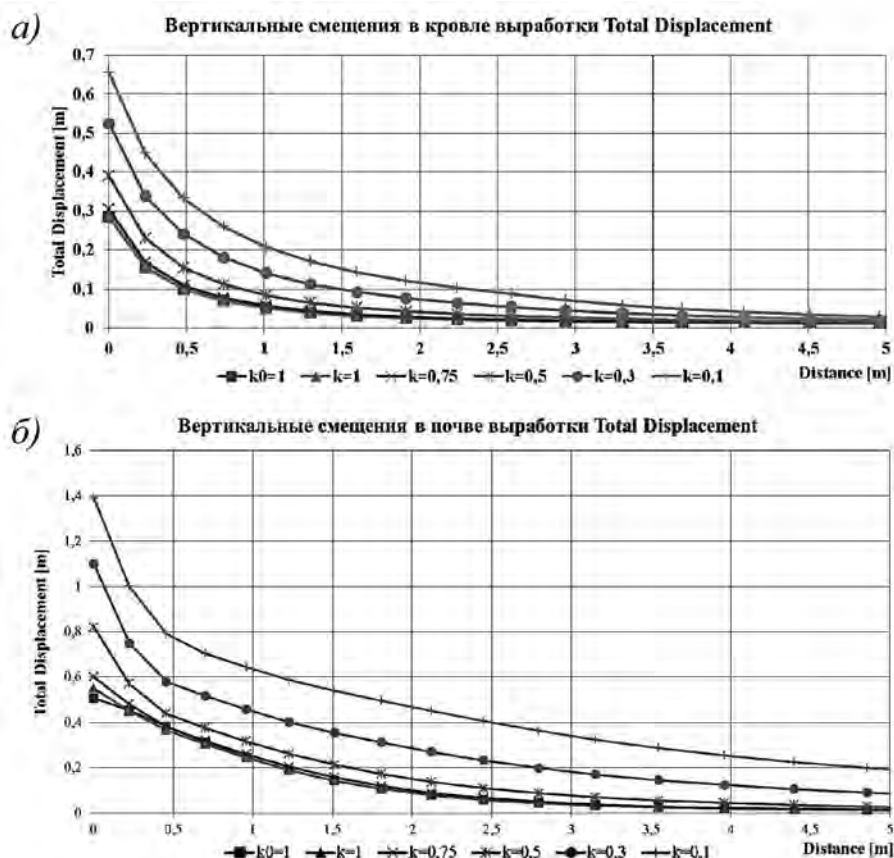


Рис. 6. Изменение вертикальных перемещений в приконтурном пространстве кровли (а) и почвы (б) выработки в зависимости от уменьшения прочности вмещающих пород

$$U_n = 0,34 \ln(k) + 0,593$$

$$R^2 = 0,9929 \quad , \quad (2)$$

$$U_k = 0,16 \ln(k) - 0,3$$

$$R^2 = 0,9921 \quad , \quad (3)$$

Здесь k – коэффициент снижения прочности (деструкции) пород.

Снижение прочности пород вокруг выработки вследствие протекания физических процессов деструкции затрагивает не только контур выработки, но и простирается вглубь массива, определяя будущую устойчивость выработки. Эти процессы в большей степени затрагивают породы кровли, увеличивая размер области пла-

стических деформаций в вертикальном направлении почти в 2 раза. На рис. 7, а, б, в последовательно показано как увеличивается область, внутри которой реализуются растягивающие напряжения, которым породы сопротивляются плохо.

Они способны образовывать те системы техногенных трещин в окрестности выработки, характерные для слабометаморфизированных пород Западного Донбасса, отмеченные в работах М.А. Выгодина [7].

Управлять этим процессом можно, своевременно изменяя механические свойства окружающего выработку породного массива, например, с помо-

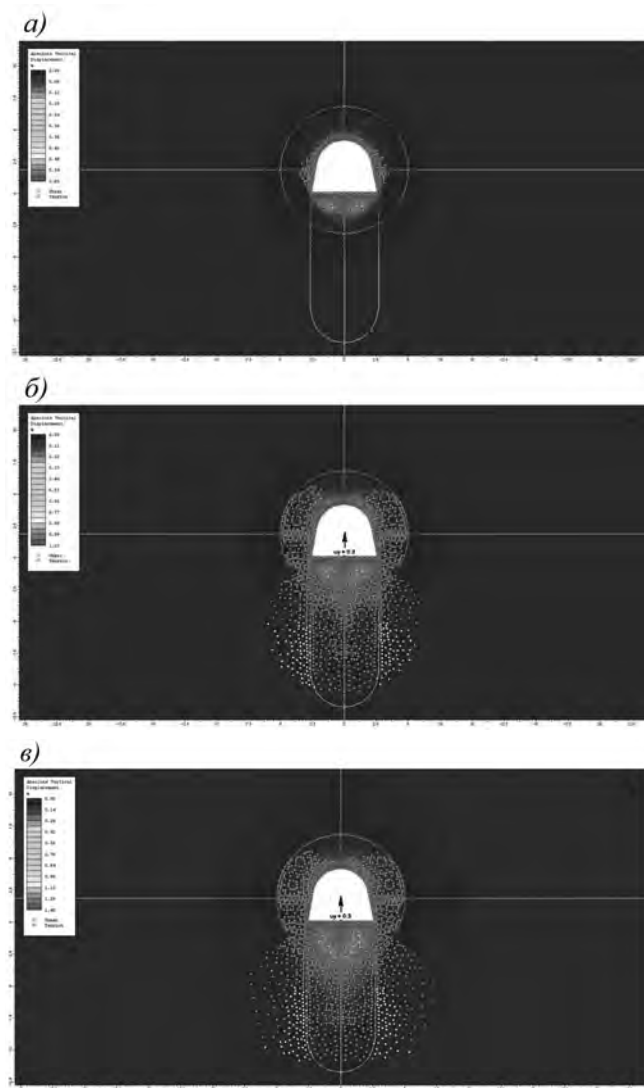


Рис. 7. Область растягивающих напряжений:
а) этап I; б) этап II; в) этап III

шью установки анкерных болтов и выполнения работ по их упрочению набрызг-бетоном.

Выводы

1. Подтверждена бифуркационная теория явления вспучивания пород почвы в горных выработках.

2. Установлено, что после момента вспучивания пород почвы (точка бифуркации) геомеханические параметры упругопластического состояния массива в кровле и боках выработки остаются практически неизменными, а в почве продолжают нарастать по нелинейному закону.

3. Получила дальнейшее развитие численная модель пучения пород почвы, которая позволила объяснить явление вывалообразования, как следствие появления растягивающих напряжений в породах кровли на завершающем этапе эволюции геомеханических процессов в окрестности капитальных протяженных выработок, сооружаемых в горногеологических условиях шахт Западного Донбасса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шашенко А.Н., Солодянкин А.Н., Мартовицкий А.В. Управление устойчивостью протяженных выработок глубоких шахт: Монография. – Киев: Днепропетровский ЛизуновПрес, 2012. – 384 с.

2. Шашенко А.Н., Тулуб С.Б., Сдвижкова Е.А. Некоторые задачи статической геомеханики. – Киев: Университетское изд-во «Пульсары», 2002. – 304 с.

3. Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Галеев С.Н. Деформируемость и прочность

массивов горных пород. – Днепропетровск, изд-во НГУ, 2008. – 224 с.

4. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. – К.: Наукова думка, 1983. – 192 с.

5. Кирничанский Г.Т. Элементы теории деформирования и разрушения горных пород. – К.: Наукова думка, 1999. – 179 с.

6. Шашенко А.Н., Кравченко К.В., Попович И.Н., Король А.Ю. Численное моде-

лирование процесса пучения пород почвы в горных выработках / Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2012, 2–5 жовтня, 2013 р. – Д.: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 2013. – С. 170–174.

7. Выгодин М.А. Обоснование параметров армопородных грузонесущих конструкций на базе рамно-анкерных крепей и технология их сооружения в выработках шахт Западного Донбасса: дис... канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1990. – 139 с. **ГНАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Смирнов Андрей Викторович – кандидат политических наук, горный инженер, e-mail: shashenkoa@nmu.org.ua, Украина, Павлоград, Компания ДТЭК ЭНЕРГО,
Король Анна Юрьевна – кандидат технических наук, заместитель директора по экономическим вопросам, e-mail: shashenkoa@nmu.org.ua, Украина, Димитрово, ОП «Шахта «Димитрова» ГП «Красноармейскуголь».

UDC 622.023.2:553.063.4

NUMERICAL SIMULATION OF THE PROCESS OF HEAVING ROCKS IN THE WORKINGS OF COAL MINES

Smirnov A.V., Candidate of Political Science, Mining Engineer, e-mail: shashenkoa@nmu.org.ua, Company DTEK ENERGO, Pavlograd, Ukraine,
Korol' A.Yu., Candidate of Technical Sciences, Deputy Director for Economic Issues, e-mail: shashenkoa@nmu.org.ua, ОП «Mine «Dimitrov» SE «Krasnoarmeyskugol», Dimitrovo, Ukraine.

Numerical geomechanical model was investigated with using the software PHASE 2 developed by the Canadian company Rocscience. The simulation was performed in three stages. At the first stage was estimated the elastoplastic state of rocks around a single mine workings. At the second – take into account the presence in it of a bifurcation point, and at the third stage considers the further influence of destruction the rock mass.

The investigations established: after the moment of heaving of rocks (bifurcation point) geomechanical parameters of elastoplastic state of the mass in the roofing and sides of mine working remain unchanged, but in the rocks continue to grow by a nonlinear law. With further loss of strength of rock mass, plastic zone around the mine working increases.

Key words: rock heaving, elastoplastic sustainability, contour rock mass, numerical simulation, finite element model, bifurcation point, the destruction rocks.

REFERENCES

1. Shashenko A.N., Solodyankin A.N., Martovitskii A.V. *Upravlenie ustoichivost'yu protyazhennykh vyrobotok glubokikh shakht: Monografiya* (Stability maintenance in long excavations in deep level mines. Monograph), Dnepropetrovsk, LizunovPrec, 2012, 384 p.
2. Shashenko A.N., Tulub S.B., Sdvizhkova E.A. *Nekotorye zadachi staticheskoi geomekhaniki* (Some problems of static geomechanics), Kiev, Universitetskoe izd-vo «Pul'sary», 2002, 304 p.
3. Shashenko A.N., Sdvizhkova E.A., Gapeev S.N. *Deformiruemost' i prochnost' massivov gornykh porod* (Deformability and strength of rock masses), Dnepropetrovsk, izd-vo NGU, 2008, 224 p.
4. Vinogradov V.V. *Geomekhanika upravleniya sostoyaniem massiva vblizi gornykh vyrobotok* (Geomechanics of rock mass control in the vicinity of underground excavations), Kiev, Naukova dumka, 1983, 192 p.
5. Kirnichanskii G.T. *Elementy teorii deformirovaniya i razrusheniya gornykh porod* (Elements of theory of rock deformation and failure), Kiev, Naukova dumka, 1999, 179 p.
6. Shashenko A.N., Kravchenko K.V., Popovych Y.N., Korol' A.Ju. *Materialy mizhnarodnoi' konferencii' «Forum girnykiv 2012, 2–5 zhovtnya, 2013 r* (Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників 2012, 2–5 жовтня, 2013 р.), Dnepropetrovsk, Derzhavnyy vyshhyj navchal'nyj zaklad «Nacional'nyj girnychyy universytet», 2013, pp. 170–174.
7. Vygodin M.A. *Obosnovanie parametrov armoporodnykh gruzonesushchikh konstruktssii na baze ramno-ankernykh krepei i tekhnologiya ikh sooruzheniya v vyrobotkakh shakht Zapadnogo Donbassa* (Substantiation of parameters for reinforced load-bearing structures based on frame-and-rockbolt support and their construction technology for mines in Western Donbass), Candidate's thesis, Dnepropetrovsk, 1990, 139 p.